

Daniel Nyman und Wolfgang Breit

Entwicklung einer modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit

Komplexe geometrische Strukturen entstehen aus einem Baukastenprinzip

Modulares Bauen bietet beim rasanten Wachstum der Städte eine Möglichkeit, den Ansprüchen unserer heutigen Zeit gerecht zu werden und entwickelt sich hin zur experimentellen und innovativen Architektur. Mit dem Forschungsvorhaben »MonoBau« wurde eine neuartige Variante der modularen Bauweise aus Sandwichelementen mit dünnen Deckschichten aus Textilbeton in monolithischer Ausführung entwickelt. Des Weiteren lässt sich anhand der flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten durch angehängte Module sowie einer minimalistisch, effizienten Architektur ein innovatives Design mit konstruktiven Tragwerksideen vereinen.



Abb. 1: MonoBau-Körper

Ausgangssituation

Seit Anfang des 21. Jahrhunderts leben erstmals mehr Menschen in Städten als auf dem Land. Die Prognosen der Vereinten Nationen gehen sogar davon aus, dass im Jahr 2050 zwei von drei Menschen in urbanisierten Gebieten leben.

KERNAUSSAGEN

- MonoBau = monolithisch, modern, minimalistisch, modular
- Innovative Architektur mit vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten
- Verwirklichung höchster Ansprüche durch betontechnologisches Know-how

Das damit einhergehende rasante Wachstum der Städte und der zur Verfügung stehende Bauplatz stellt besonders Stadtplaner und Architekten vor große Herausforderungen. Besonders die strukturellen Veränderungen in Familie und Gesellschaft erfordern ein hohes Maß an Flexibilität, welches sich auch in der Wohnraumnutzung widerspiegelt. Um diesem Umstand gerecht zu werden, müssen die vorhandenen Stadtstrukturen optimiert und ausgebaut werden. Dabei ist vor allem die Nachfrage nach neuem und preiswerterem Wohnraum groß.

Modulares Bauen – eine Bauweise, die nach dem Baukastenprinzip die einzelnen Elemente zusammenfügt und bei der komplexe geometrische Strukturen entstehen können, bietet dabei eine Möglichkeit, den Ansprüchen unserer heutigen Zeit gerecht zu werden. Durch einzelne modulare



Abb. 2: Gebäudeentwurf

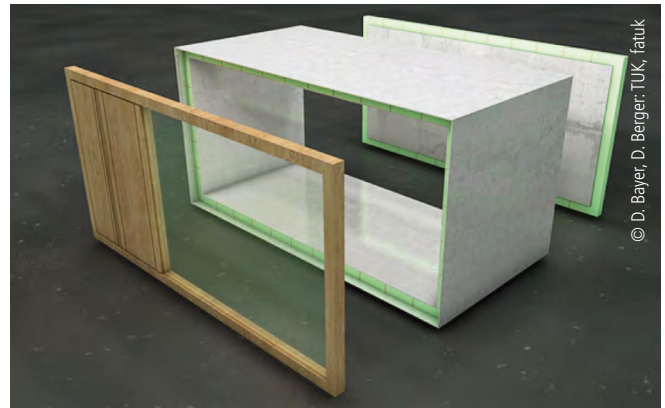


Abb. 3: Struktureller Aufbau



Abb. 4: Ansicht

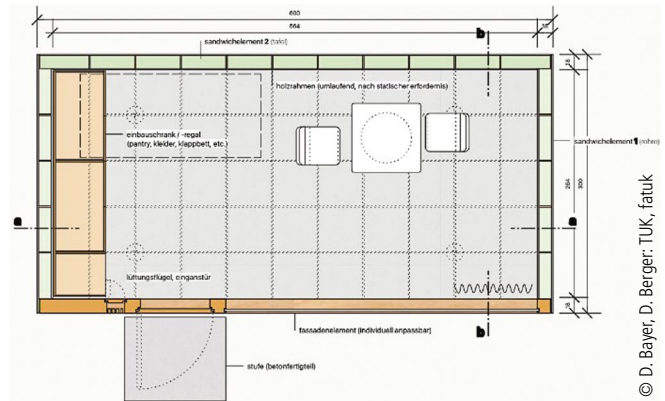


Abb. 5: Wohnkonzept

Elemente, die jederzeit flexibel ausgetauscht oder ergänzt werden können, entsteht eine wandelbare Wohneinheit, die jeder Umgebungsstruktur angepasst werden kann. Während die meisten Menschen in Deutschland die »Containerbauweise« mit Notunterkünften assoziieren, haben Architekten längst das Potenzial dieser Bauweise entdeckt. Im Vergleich zu den anfänglichen Interessen der Material- und Zeiteinsparung entwickelt sich modulares Bauen hin zur experimentellen und innovativen Architektur (siehe Abb. 1).

Ein neuer experimenteller Ansatz ist die Herstellung monolithisch konzipierter Wohnelemente aus Sandwichstrukturen mit Deckschichten aus textilbewehrtem Beton. Textilbewehrter Beton oder auch Textilbeton genannt, ist ein innovativer Verbundwerkstoff, der eine der bedeutendsten Erforschungen im Massivbau der letzten Jahrzehnte ist. Mit dem Einsatz von Carbonfasern als textiles Gelege wird die Korrosionsanfälligkeit der Bewehrung ausgeschlossen und die damit verbundene Betondeckung hinfällig. Zudem hat Carbon eine höhere Zugfestigkeit als Stahl und ist um ein Vielfaches leichter. Diese positiven Eigenschaften ermöglichen eine Herstellung von Sandwichelementen mit filigranen Deckschichten. Durch den Einsatz von Hochleistungsbetonen wird gleichzeitig eine dauerhafte, witterungsbeständige und optisch ansprechende Oberfläche geschaffen. In Kombination mit einer Dämmung als Kernmaterial lassen sich damit moderne Gebäudehüllen aus Sandwichelementen herstellen, die sehr gute bauphysikalische Eigenschaften

haben, geringen Baustoffbedarf, Modularität und moderne Architektur vereinbaren.

Der Aspekt der monolithischen Herstellung nimmt einen wesentlichen Schwerpunkt bei der Herstellung ein. Der Begriff stammt aus dem altgriechischen und bedeutet so viel wie »aus einem Guss« hergestellt. Für das monolithisch konzipierte Wohnelement bedeutet dies, der Boden, die Wände und die Decke werden gleichzeitig betoniert und es entstehen keine konstruktiven Fugen zwischen den einzelnen Bauteilen. Es impliziert eine vermeintliche Einfachheit in der Planung und Ausführung. Die Eigenschaft des Betons im Laufe der Zeit durch Feuchtigkeitsabgabe zu schrumpfen, führt jedoch besonders an den Schnittstellen der Bauteile zu Problemen. Die Verformungen des Betons werden verhindert und es entstehen Zwangsspannungen, die besonders im jungen Alter des Betons zu Schwindrissen führen können. Um das Konzept der monolithisch hergestellten Wohnelemente in die Praxis umzusetzen, mussten die Ausführbarkeit und die auftretenden Probleme analysiert und bearbeitet werden.

Konzeption

Basierend auf der grundlegenden Konzeption der modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit aus Sandwichstrukturen mit Deckschichten aus Beton ergeben sich verschiedene Raumkonzepte, die individuell anpassbar sind und somit eine vielfältige Nutzung ermöglichen. Exemplarisch für den



Abb. 6: Urbane Umsetzungsmöglichkeiten

umgesetzten Gebäudeentwurf mit einer integrierten Wohneinheit dienen die Illustrationen Abb. 2 bis Abb. 5. Sie veranschaulichen die pragmatisch, sinnvolle Nutzung eines Wohnraums für Bedürftige oder Personen mit dem Bedürfnis sich in einer wandelbaren Unterkunft verwirklichen zu können.

Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet »Methodik des Entwerfens und Entwerfen« des Fachbereichs Architektur neben den exemplarischen Wohnkonzeptideen weitere Visualisierungen für die Einsatzmöglichkeiten im urbanen Umfeld oder in Küstengebieten entwickelt (siehe Abb. 6).

Die Dimensionierung des einzelnen Moduls wurde an die allgemein zulässigen Grundabmessungen eines LKW nach § 32 StVZO [1] angepasst. Des Weiteren wurden im Zuge der Assoziation zwischen Gesamtgewicht und Mobilität des Baukörpers die Außenabmessungen mit (L/B/H) 6,0/2,4/3,0 m definiert. Die Anforderungen an die Betoneigenschaften wurden aufgrund der Aspekte des filigranen Baues sowie einer ressourcenschonenden Herstellung der Betondeckschichten wie folgt festgelegt:

- hohe Druckfestigkeit,
- hohe Dauerhaftigkeit,
- hohe Fließfähigkeit,
- möglichst geringes Schwindverhalten,
- Größtkorn ≤ 5 mm,
- Sichtbetonklasse SB4.

Frisch- und Festbetonuntersuchungen

Zur Ermittlung der Materialkennwerte der verwendeten Betone wurden die entsprechenden Frischbetonuntersuchungen nach DIN EN 12350 und die Festbetonuntersuchungen nach DIN EN 12390 durchgeführt. Dabei wurde die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [2] an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm ermittelt und die Biegezugfestigkeitsprüfungen sowie die anschließenden Druckfestigkeitsuntersuchungen von Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 [3] mit den Abmessungen von (L/B/H) 160/40/40 mm bestimmt. Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgte nach DIN EN 12390-13 [4] an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm. Im Anschluss an die Analyse des E-Moduls

wurden die zylindrischen Probekörper noch auf ihre Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 [5] untersucht.

Während der Herstellung der Probekörper wurden die in Tab. 1 aufgeführten Frischbetonparameter (Setzfließmaß, Zeit t_{500} , Frischbetonrohichte und Luftporengehalt) zum Zeitpunkt ($t = 0$ min) bestimmt. Die Verfahren zur Herstellung der Betone und zur Ermittlung der Materialeigenschaften wurden zum Vergleich unter konstanten Bedingungen durchgeführt. Die Ausgangsmaterialien wurden vor dem Mischprozess auf $(2 \pm 1^\circ \text{C})$ gekühlt und in einer definierten Reihenfolge dem Mischer hinzugegeben. Anhand der erbrachten Versuche bzgl. der differierenden Betonzusammensetzungen konnten Bandbreiten der Frischbetoneigenschaften, wie in Tab. 1 dargestellt, erzielt werden.

Tab. 1: Frischbetoneigenschaften

Setzfließmaß (SF)	Zeit (t_{500})	Frischbetondichte (D)	Luftporengehalt (Ac)
930 – 1030 mm	3,3 – 5,5 s	2 290 – 2 360 kg/m ³	1,1 – 3,2 %

Neben der Kühlung der Ausgangsmaterialien wurde zudem zur Vermeidung von Rissbildung infolge des Schwindprozesses teilweise ein Schwindreduzierer hinzugegeben. Des Weiteren wurden unterschiedliche Zemente als auch Korngrößenverteilungen zur Herstellung differierender Probekörper berücksichtigt. Die Korngröße wurde aufgrund des Blockiereffekts der Bewehrung sowie der geringen Öffnung beim Betoniervorgang variiert. Der Frischbeton zeigte bei den unterschiedlichen Hochleistungsbetonen rein optisch keine Entmischungsanzeichen und ein gutes Zusammenhaltevermögen. Dies bestätigte sich auch in den Rissflächen der untersuchten Probekörper.

Auf Basis der Festbetonanalysen ergaben sich die in Tab. 2 erzielten Materialeigenschaften, sodass die verwendeten Betone als Hochleistungsbetone bezeichnet werden können.

Tab. 2: Festbetoneigenschaften

Mittlere Druckfestigkeit ($f_{cm, cube}$)	Mittlerer Elastizitätsmodul (E_{cm})	Mittlere Spaltzugfestigkeit ($f_{cm, sp}$)
130 – 150 N/mm ²	35 400 – 43 200 N/mm ²	3,1 – 5,3 N/mm ²

Im Laufe der Forschungsarbeiten bzgl. einer optimierten Betonzusammensetzung wurde u. a. ein Konsistenzhalter eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit des Frischbetons über einen längeren Zeitraum (ca. 1,5 h) gewährleisten zu können. Die Ergebnisse hinsichtlich des Setzfließmaßes sowie die Zeit t_{500} sind exemplarisch für die ausgewählte Zusammensetzung in Tab. 3 dargestellt. Die Untersuchung umfasst den veranschlagten Verarbeitungszeitraum von 90 min, die für eine spätere Betonage des Prototyps ausreichen sollte. Vor jeder Messung wurde der Frischbeton jeweils 5 min im Mischer durchgemengt. Bei der Auswertung wurde darauf geachtet, dass die Frischbetoneigenschaften auch nach Ablauf des Untersuchungszyklus den Anforderungen eines selbstverdichtenden Betons entsprechen.

Tab. 3: Setzfließmaß und Zeit t_{500} über einen Verarbeitungszeitraum von 90 min

		t = 0 min	t = 15 min	t = 45 min	t = 90 min
Setzfließmaß SF	[mm]	1020	980	920	880
Zeit t_{500}	[s]	4	4	6	7

An den Frischbetonuntersuchungen ist deutlich die Wirksamkeit des Konsistenzhalters zu erkennen. Selbst nach einer Wartezeit von 90 min wies der Beton noch ein Setzfließmaß von 880 mm auf, womit die Konsistenzanforderung SF3 von selbstverdichtendem Beton übertroffen wurde. Dennoch traten über den Bearbeitungszeitraum hinweg keine Inhomogenitäten bzw. Entmischungserscheinungen auf.

Bauteiluntersuchungen

Zur Analyse der Sandwichelemente wurden die Bauteile mittels 4-Punkt-Biegezugversuchsaufbau hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit untersucht. Aus den Beobachtungen während und nach den Versuchen konnten wichtige Erkenntnisse über das komplexe Trag- und Verbundverhalten der einzelnen Schichten der getesteten Sandwichelemente gewonnen werden. In den beiden Tragschichten entstanden mit zunehmender Verformung Risse, bis sich ein abgeschlossenes Rissbild einstellte und nur noch ein Rissfortschritt und eine Rissvergrößerung zu beobachten waren. Während in der unteren Tragschicht erwartungsgemäß überwiegend Biegerisse auftraten, wurden in der oberen



Abb. 7: Schnitt durch ein Sandwichelement

Tragschicht neben den Lasteinleitungspunkten schräg laufende Schubrisse beobachtet. Bezüglich der Rissanzahl wurde in der unteren Tragschicht eine Mehrzahl an gleichmäßig verteilten Rissen festgestellt. Trennrisse sind in den Tragschichten in keinem der Versuche aufgetreten.

In der Kernschicht haben sich trotz der hohen Belastungen keine sichtbaren Risse gebildet. Lediglich an den Auflagerenden wurde die Dämmung zusammengedrückt und der obere und untere Teil gegeneinander verschoben, was aber nicht zu einem kompletten Bauteilversagen führte. Das Verbundverhalten und damit die Haftung zwischen Beton und Dämmung erwies sich als äußerst beständig. Es konnte bis zur maximalen Tragfähigkeit der Sandwichelemente kein Verbundversagen festgestellt werden. Dies zeigte, dass mit der gewählten Dämmplattenmaserung eine ausreichende Haftsicherung der Schichten hergestellt wurde und keine zusätzlichen Verbindungsmittel notwendig waren. Zur Überprüfung inwieweit der Beton die Rillen ausfüllte, wurden die Sandwichelemente im Anschluss der Versuche durchgeschnitten (siehe Abb. 7). Bei den stichprobenartigen Schnittflächen ist jeweils erkennbar, dass die Rillen vollständig und ohne Fehlstellen ausgefüllt wurden. Ein Ablösen der Schichten konnte auch hier nicht erkannt werden.

Das Versagen der Sandwichelemente kündigte sich mit ähnlich großen Verformungen wie bei den zuvor einzeln

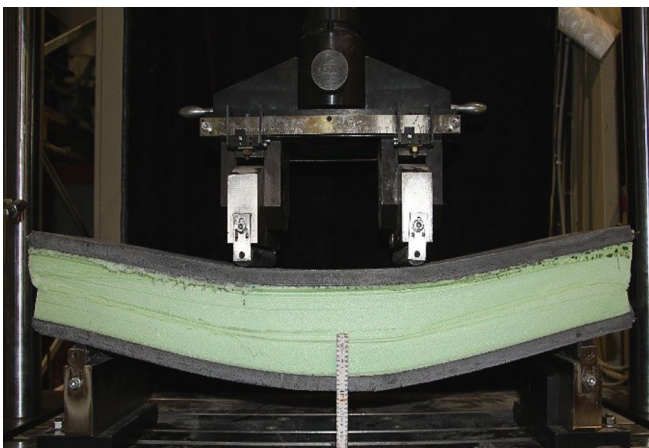


Abb. 8: Maximale Durchbiegung kurz vor Versagen

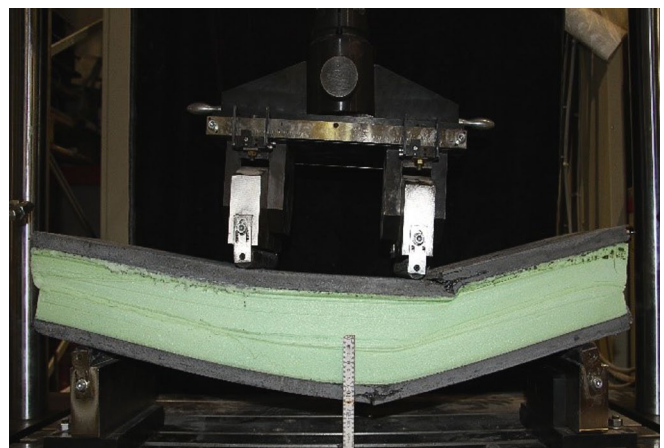


Abb. 9: Versagen des Sandwichelements

untersuchten Betonplatten (bzw. -schichten) an. Ein großer Unterschied bestand darin, dass trotz des Hauptversagens weiterhin Lasten abgetragen wurden. Dies lässt sich mit den Umlagerungsmöglichkeiten der Sandwichelemente begründen.

Das Hauptversagen entstand trotz der symmetrischen Ausführung des 4-Punkt-Biegezugversuchs nicht gleichzeitig auf beiden Seiten, sondern entweder auf der rechten oder auf der linken Seite des Versuchskörpers. Dabei handelte es sich bei allen Sandwichelementen um ein lokales Querkraftversagen der oberen Deckschicht im Bereich der Lasteinleitung. Es bildete sich zuerst an der Unterkante der Tragschicht ein Riss aus, der mit zunehmender Kraft schräg nach oben zur Lasteinleitung wanderte und im Anschluss schließlich zum Versagen führte. Hierbei platzten Stücke des Betons ab und teilweise wurde die Carbonbewehrung freigelegt. In Abb. 9 ist dieses Versagen an der rechten Lasteinleitung zu erkennen.

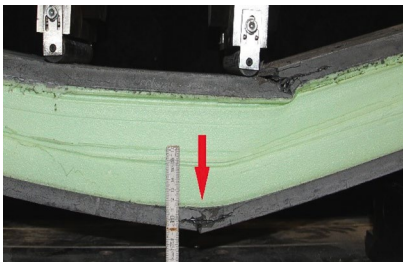
Nach Entstehung des lokalen Querkraftversagens der oberen Deckschicht konnten im weiteren Belastungsverlauf noch andere Versagensarten beobachtet werden. So entstand, wie in Abb. 9 veranschaulicht, zum Querkraftversagen zu-

sätzlich ein Biegedruckversagen der unteren Tragschicht. Eine Steigerung der Traglast konnte hingegen nicht mehr erzielt werden. Im Rahmen der Biegezugversuche konnten vier unterschiedliche Versagensformen festgestellt werden. Die Versagensarten sind in Tab. 4 beschrieben.

Das in Abb. 10 dargestellte Last-Verformungs-Diagramm stellt einen typischen Verlauf der untersuchten Probekörper dar. Das aufgezeichnete Verhalten lässt sich in drei unterschiedliche Bereiche unterteilen:

- Bereich I: Der erste Bereich wird durch einen starken Lastanstieg mit geringen Verformungen gekennzeichnet. Die Laststeigerung nimmt annähernd linear zu.
- Bereich II: In diesem Bereich flacht durch die Entstehung von mehreren Rissen in den Tragschichten die Lastverformungskurve infolge eines Steifigkeitsverlustes ab. Dieser Bereich hält solange an, bis ein Versagen des Bauteils eintritt und die Last drastisch abfällt.
- Bereich III: Der letzte Bereich wird dadurch gekennzeichnet, dass trotz des Versagens des Bauteils die Last infolge der Umlagerungsmöglichkeiten im Sandwichelement wieder leicht ansteigt. Ein Erreichen der maximal aufgetragenen Last ist aber nicht mehr möglich.

Tab. 4: Versagensarten der Sandwichelemente

Beschreibung	Beispielaufnahme
Lokales Querkraftversagen der oberen Deckschicht: Diese Versagensart bildete bei allen Versuchen die Maßgebende. Es bildete sich ein diagonal verlaufender Schubriss über die vollständige Höhe der oberen Tragschicht aus. Der Schubriss stellte sich aufgrund der einleitenden Last direkt neben der Lasteinleitungsrolle im Bereich der hohen Querkraft ein.	
Lokales Biegedruckversagen der unteren Deckschicht: Das Versagen trat infolge großer Verformungen durch ein Einschnüren der Betondruckzone und damit einhergehender Überschreitung der Druckfestigkeit des Betons ein. Dieses konnte zeitlich kurz nach dem lokalen Querkraftversagen beobachtet werden.	
Schubversagen zwischen Kern und Deckschicht: Bei dem Schubversagen löste sich die obere Deckschicht von der Kernschicht und ragte einige Zentimeter über den Kern hinaus. Das Versagen des Verbunds zwischen den Schichten trat allerdings erst nach dem Querkraftversagen auf und wurde durch den querlaufenden Riss wahrscheinlich begünstigt, indem die Betonplatte seitlich nach oben geschoben wurde.	
Druckversagen im Kern am Auflager: Das Druckversagen im Kern bildete sich meist in der Mitte der Kernschicht aus. Es zeigte sich ein Knick in der Dämmung, der durch die gegenseitige Verschiebung der unteren und oberen Hälfte des Sandwichelements entstand. Das Versagen trat teilweise schon vor dem Querkraftversagen auf, führte aber zu keinem Lastabfall.	

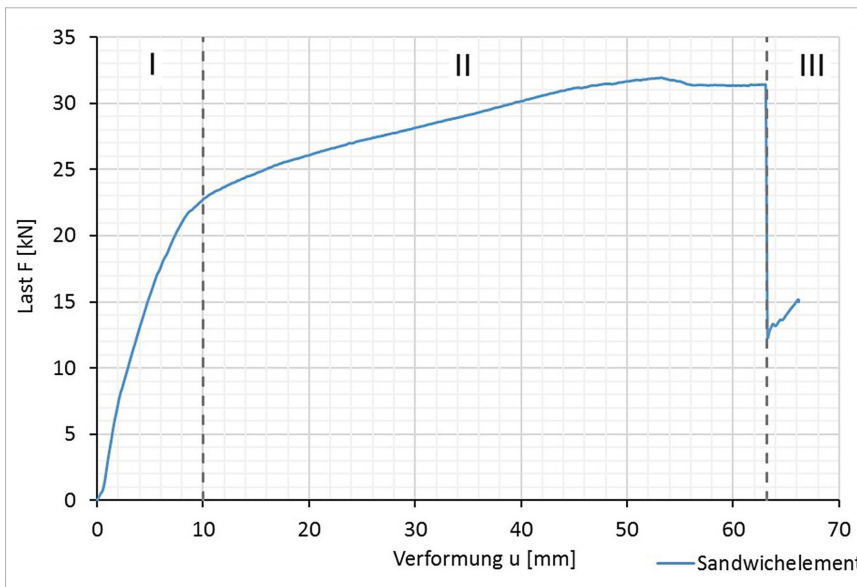


Abb. 10: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Sandwichelemente

Der exemplarische Last-Verformungsverlauf demonstriert, dass mit dem gewählten Querschnitt der Sandwichelemente bestehend aus einer beidseitigen, dünnen Textilbetondeckschicht zzgl. einer aufgetragenen Vorspannung und der zwischenliegenden Kernschicht aus einer XPS-Dämmung Auflasten von über 30 kN verwirklicht werden konnten. Im Vergleich zu den einzelnen Betonplatten mit Bewehrung wurde eine vier- bis sechsfache Steigerung der maximalen Tragfähigkeit realisiert. Infolge der Umlagerungsmöglichkeiten der Lasten im Sandwichelement war der Steifigkeitsabfall bei der Entstehung erster Risse deutlich geringer als bei den Betonplatten. Die Kernschicht konnte einen wesentlichen Anteil zur Begrenzung der Verformungen und der Aufnahme der Kräfte beitragen.

Die Verbundfestigkeit der einzelnen Schichten, welche für Sandwichelemente von essenzieller Bedeutung ist, konnte mit der verwendeten Maserung in der Dämmplatte ohne Verbundmittel gewährleistet werden. Vor allem um die Reduzierung der Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit einzuhalten, musste eine ausreichende Verbundfestigkeit vorliegen. Die Profilierung wurde hierbei ausreichend groß gewählt, um ein vollständiges Verfüllen zu ermöglichen und demzufolge eine gute Haftung der Schichten sicherzustellen. Ein Versagen der Verbundfestigkeit wurde bei den Versuchen erst nach dem lokalen Querkraftversagen beobachtet und war damit für das Bauteil nicht mehr entscheidend.

In der Kernschicht, die hauptsächlich Quer- bzw. Schubkräfte aufnimmt, zeigten sich keine Risse während der Versuchsdurchführung. Des Weiteren sind keine nennenswerten Stauchungen in der Mitte der Kernschicht aufgetreten. Lediglich im Auflagerbereich konnte eine gegenseitige Verschiebung der oberen und unteren Hälfte der Dämmung mit einem leichten Knick beobachtet werden.

Bei den Biegezugversuchen der unterschiedlichen Sandwichelemente konnten im Allgemeinen ähnliche Versagensformen des Bauteils festgestellt werden. Somit ließen sich erste Prognosen für das mögliche Versagen des monolithisch hergestellten Probekörpers treffen. Die erzielten

Tragfähigkeiten dienten ebenfalls als erste Hinweise.

Prototyp Untersuchungen

Die großmaßstäblichen Untersuchungen erfolgten im Labor des Fachbereichs Konstruktiver Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern. Zur Messung der maximalen Verformungen des Prototyps wurden neben den induktiven Wegaufnehmern an den Außenflächen der Betondeckschichten zur Untersuchung der einzelnen Verschiebungen im Querschnitt der Sandwichstruktur eine fotogrammetrische Messung durchgeführt.

Bei den Untersuchungen konnten die typischen Merkmale der zuvor analysierten Sandwichelemente auch bei den großmaßstäblichen Bauteilversuchen beobachtet werden. Mit zunehmender Verformung entstanden in den Tragschichten

dem Momentenverlauf angepasste Biegezugrisse. Diese bildeten sich in einem regelmäßigen Abstand aus und verliefen über die komplette Querschnittsbreite. In der Dämmung konnten zunächst augenscheinlich keine Risse und Stauchungen beobachtet werden. Ein Verbundversagen der einzelnen Schichten konnte ebenfalls nicht konstatiert werden.

Eine Versagensform, die in den vorherigen Bauteilversuchen nicht zu beobachten war, stellte sich erst bei den großmaßstäblichen Probekörpern ein. Hierbei handelte es sich um das Aufklaffen der Verbindungsfugen zwischen den einzelnen XPS-Dämmelementen. Erste Rissanzeichen in der Mitte der Fuge konnten bei einer Durchbiegung von 23 mm in Feldmitte festgestellt werden. Wie beim exemplarischen Endzustand der großmaßstäblichen Bauteilversuche (Abb. 11) dargestellt, wanderte der Riss mit steigender Verformung zu den Betondeckschichten und bildete sich dort als parallel laufender Riss in den Schichtübergängen weiter aus. Eine Abnahme der aufgetragenen Last wurde dadurch nicht beobachtet. Nachdem sich der Riss über die vollständige Höhe der Kernschicht eingestellt hatte, wurde eine deutliche Rissbreitenöffnung erkennbar. Die maximal abgelesene Rissbreite betrug 10 mm.

Im weiteren Bauteilversuch entwickelten sich bei größeren Verformungen in Feldmitte in der oberen Tragschicht neben der Krafteinleitung flach verlaufende Biegeschubrisse, bis schließlich die obere Deckschicht des Sandwichelements versagte. Mit Auftreten des lokalen Querkraftversagens in Feldmitte war die Maximallast erreicht und damit die maßgebende Versagensart der Wohnraumhülle identifiziert. Im Anschluss nahmen die Verformungen stetig zu, wobei ein stufenweiser Lastabfall zu verzeichnen war. Der Versuchsvorgang wurde jeweils mit dem Biegezugversagen der Rahmenecke abgeschlossen. Hierbei entwickelte sich, wie in Abb. 11 demonstriert, ein diagonal verlaufender Riss von der Außenkante der Rahmenecke durch die äußere Betondeckschicht bis weit in den XPS-Kern hinein. Ein Schubversagen der Betondeckschicht zur Polystyrol-Dämmung des Sandwichelements sowie ein Biegedruckversagen der unteren Deckschicht konnte hingegen nicht diagnostiziert werden.



Abb. 11: Exemplarischer Endzustand der großmaßstäblichen Bauteilversuche

Das Last-Verformungs-Diagramm aus Abb. 12 wies bis zu einer Lastaufnahme von ca. 45 kN bei gleichzeitiger Durchbiegung von ca. 30 mm ein lineares Tragverhalten auf. Danach nahm das Lastaufnahmevermögen exponentiell ab, bis sich bei einer einleitenden Kraft von ca. 47 kN ein Plateau ausbilden konnte. Der Beginn dieses Plateaus war verbunden mit dem Entstehen erster Schubrisse an der Lasteinleitung. Die sich danach einstellenden Verformungen ohne einen Abfall der Last verdeutlichen die großen Lastumlagerungsmöglichkeiten des Tragwerksystems. Erst bei einem Mittelwert von 81 mm zeigte sich ein Kraftabfall. Dieser Lastabfall korreliert mit dem lokalen Querkraftversagen der oberen Deckschicht.

Im Anschluss begann das Lastaufnahmevermögen stufenweise abzufallen. Nachdem die Verformung in Feldmitte im Durchschnitt über 110 mm betrug, konnte eine deutlichere Abnahme der Last festgestellt werden. Dieses Bauteilverhalten war mit dem Entstehen des querlaufenden Biegezugrisses in der Bauteilecke verbunden. Die erzielte Maximalkraft lag bei knapp 49 kN in Verbindung mit einer Verformung von ca. 73 mm. Diese Werte übertrafen die Ergebnisse aus den Kleinbauteilversuchen deutlich, was mit der günstigeren Momentenverteilung begründet werden kann.

Bei der Auswertung der fotogrammetrischen Messung wurden für eine detaillierte Untersuchung des Sandwichelements aus dem Markierungsbereich, wie in Abb. 13 dokumentiert, unterschiedliche Punkte ausgewählt. Somit konnte eine genauere Aussage über das Verformungsverhalten des Tragwerksystems getroffen werden. Bei der Auswahl der Markierungen wurde ein regelmäßiger Abstand mit zwei bis drei Punkten über die gesamte Querschnittshöhe selektiert. Der obere sowie untere Messpunkt befand sich mit Ausnahme des ersten Punktes am Übergang der Schichtgrenzen und der mittlere Messpunkt in der Mitte der Kernschicht. Der erste Punkt wurde zum Vergleich der Wegaufnehmer in Feldmitte direkt unter der Lasteinleitung gesetzt.

Für eine geeignete Darstellung des vertikalen Verschiebungsverhaltens der einzelnen Punkte sind diese als polynomische Trendfunktionen wiedergegeben. Die Werte der übereinanderliegenden Punkte im Querschnitt sind in Abb. 14 für eine bessere Übersicht farblich angepasst.

Von besonderem Interesse sind die Verformungen vor dem Erreichen der Versa-

genslast, womit auch Aussagen über die Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gewonnen werden können. Vergleicht man die Ergebnisse der Punkte, die im Längsquerschnitt in der gleichen Lage liegen, sind die Kurven praktisch identisch. Erst nach dem Abfall der Last deutet sich eine ungleichmäßigere Verformung an.

Ergebnisse der Messpunkte eins bis drei unterhalb der Lasteinleitung decken sich mit den aufgezeichneten Werten der Weg-

aufnehmer. Die gemessene Verformung mit den Wegaufnehmern bei der Maximallast betrug bspw. ca. 73 mm und der Mittelwert der Messpunkte 74,8 mm. Die Aufzeichnung der Messwerte von Punkt 1 wurde nach dem Versagen der oberen Deckschicht abgebrochen, was an einem Riss in diesem Bereich lag und die Messaufzeichnung störte.

Fazit

Der Schwerpunkt des vom Bundesamt für Bauwesen und Raumforschung (BBR) geförderten Forschungsprojekts lag in der Entwicklung eines geeigneten Herstellverfahrens der monolithischen Wohneinheit und der anschließenden Untersuchung der Wohnraumhülle bezüglich des Last-Verformungsverhaltens sowie der optischen Erscheinung.

Wie sich beim Aufbau des Schal- und Vorspannsystems zeigte, bedarf die Konzeption der Eckdetails eine sorgsame und detailgenaue Planung. Die erforderliche Segmentierung der einzelnen Bestandteile musste auf jedes darauffolgende Ausführungselement angepasst werden, damit die innen liegenden Carbonfasermatten ohne Probleme nach Außen geführt werden konnten. Neben den Eckdetails benötigten auch die Halterungskonstruktionen und das Vorspannsystem eine passgenaue Abstimmung der Abmessungen. Aus diesen Gründen erwies sich die Herstellung der Probekörper als äußerst aufwendig und zeitintensiv.

In umfangreichen Versuchen wurde schließlich das Traglastverhalten der Wohnraumhülle näher untersucht. Die Durchbiegungen, bis kurz vor Erreichen der Maximalkraft, waren dabei verhältnismäßig gering. Das Versagen der

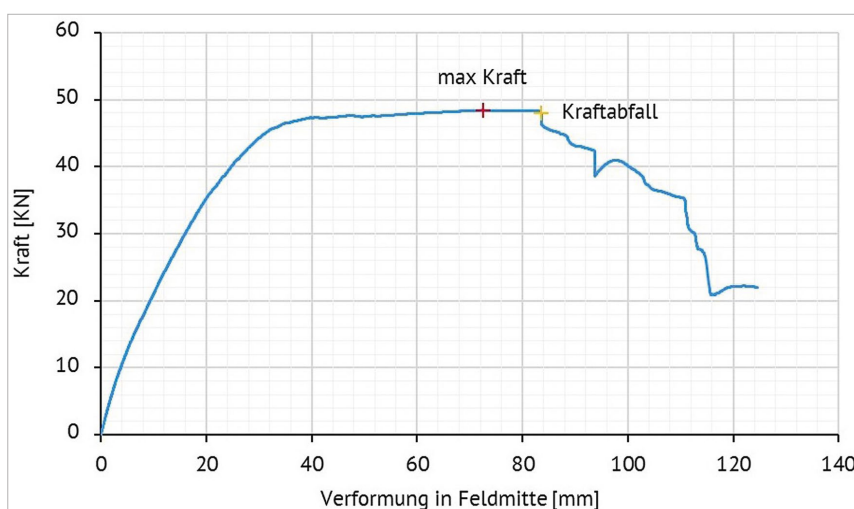


Abb. 12: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Prototypen (induktiver Wegaufnehmer in Feldmitte)

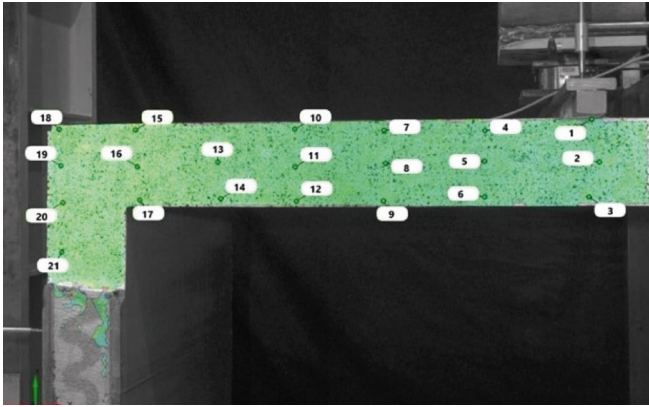


Abb. 13: Markierungspunkte der fotogrammetrischen Analyse

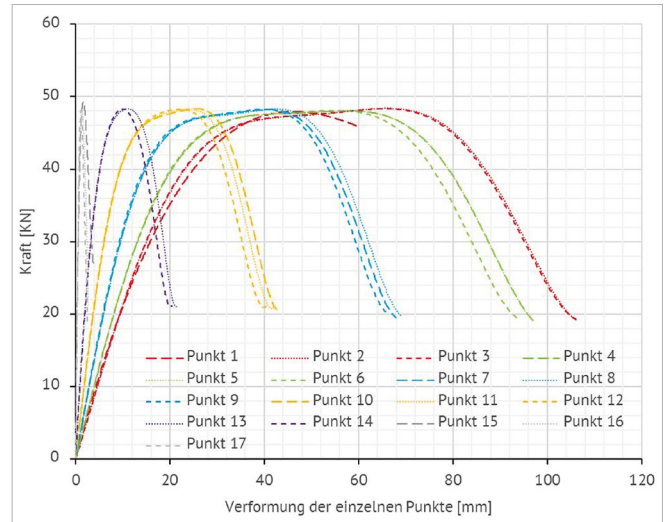


Abb. 14: Typisches Last-Verformungs-Diagramm der Prototypen (Fotogrammetrische Analyse)

Wohnraumhülle ging mit einem lokalen Querkraftversagen an der Lasteinleitung einher. Infolge der Umlagerungsmöglichkeiten im Bauteil konnte kein schlagartiger Abfall der Last beobachtet werden. Besonders auffallend war während der Versuchsdurchführung das frühe Aufklaffen der Fuge zwischen dem Dämmplattenstoß.

Begleitend zu den Bauteilversuchen wurden die jeweiligen Frisch- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Betonagen untersucht. Die erzielten Festigkeiten und Konsistenzwerte konnten den Ansprüchen eines selbstverdichtenden Hochleistungsbetons gerecht werden. Die Adaptation des Betongemischs stellte sich als äußerst vorteilhaft für die Herstellung des Prototyps dar und konnte die Problematik des frühen Ansteifens während der ersten Versuchsreihen beseitigen. Zudem konnte eine äußerst schwindarme Betonzusammensetzung mit einer Verkürzung von bis zu 1,5 mm/m entwickelt werden.

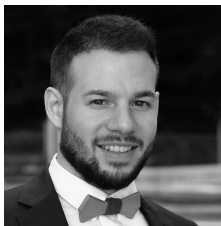
Ausblick und Diskussion

Mit diesem Forschungsvorhaben wurde das Spektrum der modularen Bauweise erweitert. Die zunächst kalkulierten Herstellungskosten für einen fertigen MonoBau-Körper belaufen sich auf ca. 33 000 € und können infolge einer Serienfertigung eventuell noch entscheidend verringert werden, sodass dieser Baukörper für Wohngebiete in urbanen Siedlungen eine interessante wie auch wirtschaftliche Alternative darstellen kann. Anhand der flexiblen Gestaltungsmöglichkeiten durch angehängte Module sowie einer minimalistischen, effizienten Architektur lässt sich ein innovatives Design mit konstruktiven Tragwerksideen vereinen.

Literatur

- [1] Straßenverkehrsrecht. Sonderausgabe 53. München: Dt. Taschenbuch-Verl.; Beck, 2015 (dtv)
- [2] DIN EN 12390-3:2009-07 Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- [3] DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.
- [4] DIN EN 12390-13:2014-06 Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung.
- [5] DIN EN 12390-6:2010-09 Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern.
- [6] Breit, Wolfgang; Nyman, Daniel: Entwicklung einer modularen, flexiblen und mobilen Wohneinheit – MonoBau. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019

DIE AUTOREN



Daniel Nyman, M. Eng.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern. Lehrbeauftragter für das Internationale Studienkolleg der Hochschule Kaiserslautern.

Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Gottlieb-Daimler-Straße 66
67663 Kaiserslautern
daniel.nyman@bauing.uni-kl.de
wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Leiter des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern. Vorstandsmitglied des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Mitglied in zahlreichen Gremien des DIN, DAfStb, DVGW